我国中高纬度地区冻融指数变化与冷暖急转现象①

代海燕[1]， 陈高娃[2]， 吴建华[3]， 杨丽萍[1]， 都瓦拉[1]
（1. 内蒙古生态与农业气象中心，内蒙古 呼和浩特 010051；2. 呼伦贝尔市气象局，内蒙古 呼伦贝尔 021008；
3. 赤峰市气象局，内蒙古 赤峰 024000）

摘 要：利用我国中高纬度地区13个国家基准气候站近30 a日平均气温数据，分析中高纬度区域年冻融指数和冻融日数的变化趋势，结果表明：① 近30 a研究区融化指数（thawing index，TI）处于显著上升过程，冻结指数（freezing index，FI）呈微弱上升趋势。② 融化日数的上升和冻结日数下降趋势不显著。③ 日平均TI呈显著上升，日平均FI则微弱下降，小于－10 ℃的天数呈微弱上升趋势。冷暖季节日均气温有两极化发展趋势。④ 研究区大于10 ℃累计积温显著增加，小于－10 ℃累计积温呈下降趋势，冷暖在向两极发展的同时，过渡期日数显著缩短，冷暖急转现象尤为明显。⑤ TI各指标的波动明显小于FI，TI与纬度和海拔呈显著负相关，FI则与纬度和海拔呈正相关，海拔对TI的影响要大于FI，纬度和海拔越高，FI和冻结日数的变化越小，而对应的融化指标波动越大。整体来看，我国中高纬地区从20世纪90年代后存在增温减缓、冷暖季日均气温两极化及冷暖急转现象较为明显。

关键词：冻结指数；融化指数；气候异常；中高纬地区；中国

政府间气候变化专门委员会（IPCC）第五次评估报告[1]指出，1901—2012年全球平均地表温度升高0.89 ℃，研究期间世界各地均有突出性变暖现象。同时，该报告阐明15 a（1998—2012年）中，全球监测的地表温度变暖趋势放缓，1951—2012年变化幅度为33%～50%。Carter[2]也发现全球气候变暖出现停滞现象，诸多学者对此现象的出现进行了大量研究，对其形成的原因进行了分析[3－14]。Knight等[3]和Kerr[4]利用1998—2012年的气象资料进行了全球气候变化的对比研究，也得出气候变暖停滞的现象。同时也有研究人员提出不同观点[10－12]，如Karl等[11]提出部分变暖放缓原因是气象资料处理方式不同导致的，还有人认为，虽然全球温度低水平波动或增温速率变缓现象频繁出现，但近一个世纪以来整体变暖趋势较为明显[13]。总体来看，不同区域温度变化存在显著差异，在全球变暖的背景下，我国北方高纬度地区增温尤为明显，高于全国平均水平[15－16]。但在20世纪90年代后，又有研究表明中高纬度地区温度变化趋于平缓，甚至大陆冬季的地表温度存在着由增暖转变为近10 a中性甚至变冷的系统性减弱现象，增温速率明显低于全球及全国平均水平[17－18]。在气温变暖的条件下，中高纬度地区的冻土层也发生明显变化，其所在的冰冻圈成为气候变化的热点区域[19－22]，根据实地冻土观测显示，随着气温升高冻土深度在变浅变薄，温度上升导致永冻土加速消融[23－26]。这种现象会改变冻土地区环境和水文工程[27－32]。冻土的研究离不开温度的变化，而冻融指数又和温度紧密相关，是气候变化研究领域的重要指标。鉴于此，本文将我国中高纬度地区作为研究区域，基于冻融指数分析地区温度变化特征，其增暖速率与Lu和李喜仓等[15－16]的研究结果并不一致。另外，我国东北部地区冬季负积温绝对值增加，正积温也在增加，气候有两极化趋势，年平均气温10 ℃和－10 ℃过渡期明显缩短，存在明显的“冷暖急转”现象。

1 研究区概况与研究方法

1.1 研究区概况

研究区以东北地区黑龙江省9个站点，内蒙古3个站点，吉林省1个站，范围45.22°～50.48°N、121.23°～132.50°E，海拔53.60～739.70 m（表1）。

① 收稿日期：2019－03－26； 修订日期：2019－07－05
基金项目：国家自然科学基金项目（41461102）；林业公益性行业专项（201304206）；内蒙古自然科学基金项目（2016MS0376，2017MS0377，2010MS0606）资助
作者简介：代海燕（1978－），男，博士，主要从事林业气象与生态气象方面的研究．E-mail：daihaiyan2003@163.com
通讯作者：杨丽萍．E-mail：ylp725121@126.com

表 1 研究区站点基本信息

Tab. 1 The Greater Khingan Mountains in Inner Mongolia ecological function areas basic information

站名	省份	地市	纬度/(°)	经度/(°)	海拔/m
尚志	黑龙江	哈尔滨	45.22	127.97	189.70
肇州	黑龙江	大庆	45.70	125.25	148.70
佳木斯	黑龙江	佳木斯	46.82	130.28	81.20
海伦	黑龙江	绥化	47.43	126.97	239.20
同江	黑龙江	佳木斯	47.65	132.50	53.60
富裕	黑龙江	齐齐哈尔	47.80	124.48	162.40
乌伊岭	黑龙江	伊春	48.57	129.43	404.50
孙吴	黑龙江	黑河	49.43	127.35	234.50
加格达奇	黑龙江	大兴安岭	50.40	124.12	371.70
博克图	内蒙古	呼伦贝尔	48.77	121.92	739.70
索伦	内蒙古	兴安盟	46.62	121.23	499.30
图里河	内蒙古	呼伦贝尔	50.48	121.68	732.60
白城	吉林	白城	45.63	122.83	155.40

研究区北部以大兴安岭林区为主,东西两侧以大小兴安岭为主,南部为松嫩平原,东部为三江源平原和完达山地区。本区占据我国最北与最东 2 个端点,位于中纬度大陆东岸,是我国纬度最高的地区,其气候类型属于温带季风气候,气候特征为冬季严寒而漫长,夏季暖湿而短促。1 月平均气温 −12 ~ −30 ℃,是世界上同纬度陆地气温最低的地区,夏季于 7、8 月到来,具有雨热同期的特点。

1.2 资料来源

本文使用资料主要为 45°N 以北,120°E 以东的我国中高纬度地区 13 个国家基准气候站近 30 a 日平均气温观测数据。考虑到使用月平均气温计算冻融指数会带来误差,本文采用逐日平均气温数据(air temperatue,TA)得到年空气冻融指数(freezing-thawing index)。

气温数据在 1986 年后相对稳定,个别缺测值采用前后平均值法进行插值[22]。因国家气象资料信息网 2016 年后日数据获取有限,30 a 数据未更新到最近的 2018 年。

1.3 研究方法

冻融指数是指空气冻融指数,是距地表 1.50 m 高度日平均气温的累计值[31-33]。以下为各指数的计算公式和起止时间说明:

$$FI = \int_{t_0}^{t_1} \left| T \right| \mathrm{d}t, T < 0\ ℃,$$
$$TI = \int_{t_2}^{t_3} T\mathrm{d}t, T > 0\ ℃ \quad (1)$$

式中:FI 为冻结指数;t_0是指每年的 7 月 1 日;t_1为第 2 年的 6 月 30 日,(℃·a*),其中 a*(7 月 1 日至翌年 6 月 30 日),为同一连续冻结期年。冻结指数的计算为冻结期日平均温度低于 0 ℃日期温度的绝对值。TI 是融化指数;t_2为每年的 1 月 1 日;t_3为当年的 12 月 31 日(℃·a)。年冻结日数为 $T<0$ ℃的天数,年融化日数为 $T > 0$ ℃的天数。

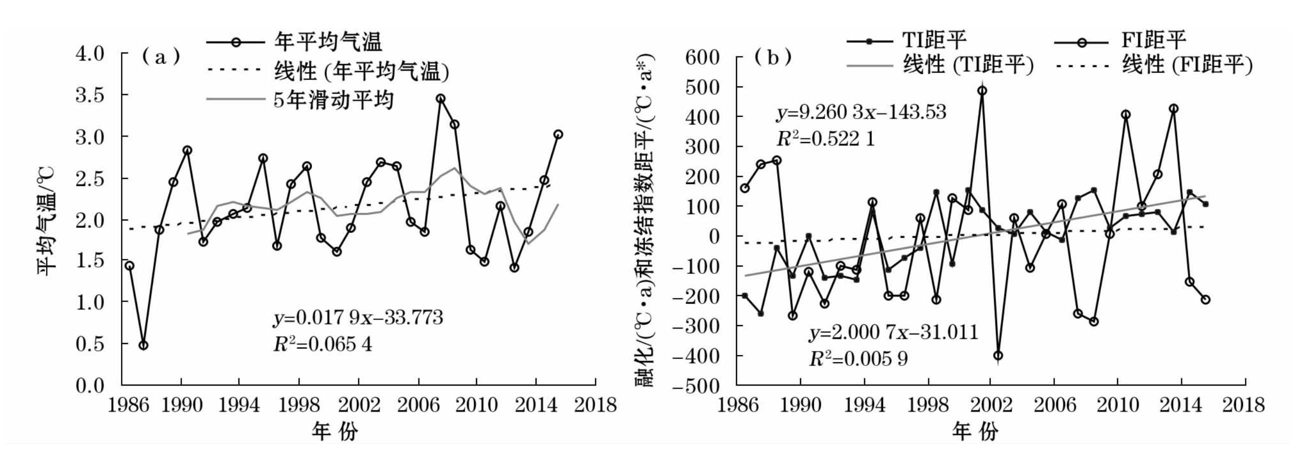
2 结果与分析

2.1 冻融指数特征及变化趋势

1986—2015 年我国中高纬度地区气温呈不显著逐渐上升趋势,20 世纪 90 年代后气温变化更趋于平缓,这与 2000 年以来全球变暖开始减弱甚至已经停止变暖,变暖速率显著减缓的研究结果[2,17]一致。研究区气候倾向率为 0.179 ℃·(10a)$^{-1}$,增温速率明显低于全球及全国平均水平[17-18](图 1a)。TI 和 FI 分析结果(图 1b)表明:近 30 a 研究区 TI 年平均值为 2 912.40 ℃·a, FI 为 2 141.47 ℃·a*,波动范围依次为 2 654.32 ~3 068.36 ℃·a, 2 631.17 ~1 738.89 ℃·a*。年 TI 处于显著上升趋势,与当前气候变暖结果一致。FI 变化趋势与 TI 差异明显,区域平均呈现微弱的上升趋势,其中 8 个站点呈微弱上升趋势,4 个站点为微弱减少趋势,表明东北地区冷季并没有表现出变暖的趋势,该结果与 Cohen 等[17]提出的北半球大陆冬季的地表温度存在着由增暖转变为近 10 a 中性甚至变冷的系统性减弱现象一致。

2.2 冻融日数与均值变化

融化日数和冻结日数分析表明:近 30 a 研究区年均融化日数为 210.11 d,年均冻结日数为 154.54 d。融化日数呈上升趋势,冻结日数呈下降趋势(图 2a),都未达到显著水平。TI 值和 FI 值分析表明:研究区日均 TI 值为 13.79 ℃·d, 日均 FI 值为 13.70 ℃·d,日均 TI 呈显著上升趋势(图 2b),表明该地区大于 0 ℃暖季变暖趋势明显,其中 7 个站点极显著上升,3 个站点显著上升,3 个站点上升不显著。研究区日平均 FI 呈微弱上升趋势,其中 12 个站点呈不显著上升趋势,仅佳木斯站点呈显著上升趋势。上述研究结果表明:东北地区小于 0 ℃冷季并没有变暖的趋势,小于 0 ℃和大于 0 ℃的积温日均值呈冷暖相反的变化趋势,即暖季越暖、冷季微弱变冷。表明在全球变暖的同时,中高纬度地区气候有两极化发展的趋势。



注:TI 为融化指数;FI 为冻结指数。

图 1 近 30 a 我国中高纬度地区年平均气温变化以及融化指数(TI)和冻结指数(FI)距平变化

Fig. 1 Nearly 30 years middle and high latitude regions thawing index and frozen index anomaly curve

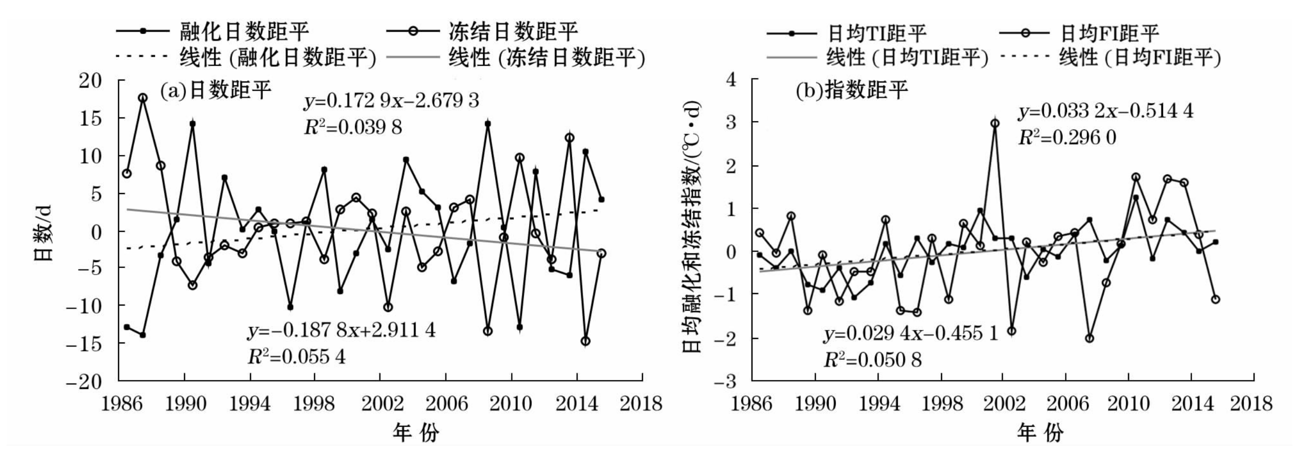


图 2 近 30 a 我国中高纬度地区融化和冻结日数及其日均 TI 和 FI 距平

Fig. 2 Nearly 30 years areas melting, frozen days, and daily mean thawing index and frozen index anomaly curve in middle and high latitude regions of China

2.3 冷暖过渡期变化

近 30 a 大于 10 ℃积温呈极显著增加趋势,小于 -10 ℃负积温呈微弱减小趋势,表明研究区大于 10 ℃温暖期变暖趋势明显,而小于 -10 ℃寒冷期反而有微弱变冷趋势(图 3a)。大于 10 ℃的日数呈显著增加趋势,小于 -10 ℃日数也呈微弱增加趋势,两者过渡期显著减少,过渡期明显缩短(图 3b)。表明研究区年平均气温 10 ℃和 -10 ℃过渡期明显缩短,我国中高纬度地区冬季两端存在明显的"冷暖急转"现象,夏秋季明显延长,这与 Cohen 等[17]等得出的冬季变暖减弱的研究结果一致,与冯青荣等[34]得出东北北部严寒期延长趋势明显以及代海燕等[35]得出内蒙古气候变暖的同时东部地区冷季变冷等结论相一致。

2.4 统计特征与相关性分析

研究区冻融各指标统计分析结果表明:TI 各指标平均值要高于对应的 FI,FI、冻结日数和日均 FI 的波动程度明显大于对应的 TI 指标(表 2)。纬度与冻结各指数极显著正相关,与融化各指数极显著负相关,各指数与经度没有显著相关性,表明纬度是热量分配的最主要影响因子,热量在经向分布没有明显的差异性。海拔与融化各指数极显著负相关,与 FI 和冻结日数显著正相关,与日均 FI 相关不显著,表明研究区海拔是热量分配的次要影响因子,对 TI 的影响要大于 FI(表 3)。经度、纬度和海拔与各指标的统计特征相关性分析表明:纬度和海拔越高 FI 和冻结日数的变化越小,TI 和融化日数的变动越大,而海拔对 TI 和融化日数波动程度的影响要大于纬度。对 FI 和冻结日数波动程度而言,纬度的影响要大于海拔。各指数的统计特征与经度没有显著相关性。冻结日数标准差与纬度极显著负相关,表明随着纬度的增加,冻结日数波动明显变小(表 4)。

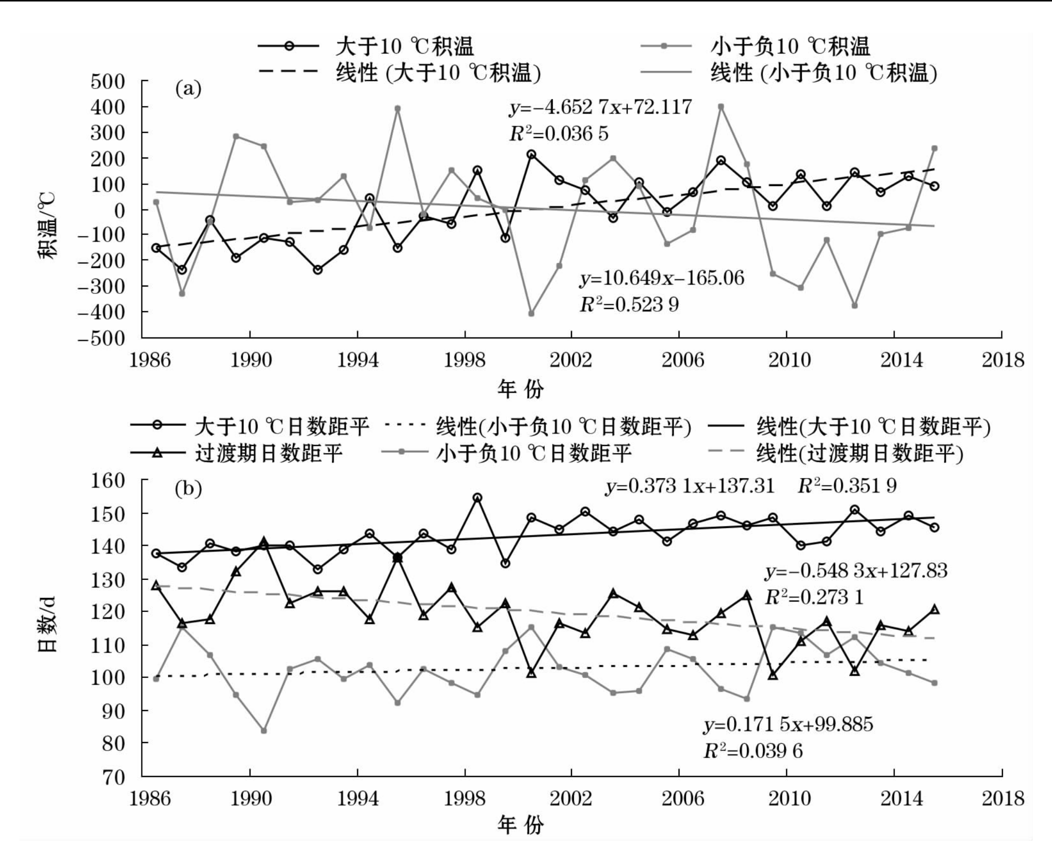


图 3 近 30 a 中国中高纬度地区 >10 ℃和 < -10 ℃积温及其日数和两者过渡期日数变化

Fig. 3 Nearly 30 years melting >10 ℃ and < -10 ℃ accumulated temperature, >10 ℃, <10 ℃ and transitional days tendency anomaly curve

表 2 冻融指数、日数及日均值统计特征

Tab. 2 Statistical characteristics of freezing and thawing index, number of days and daily mean value

统计特征	平均值	标准差	变异系数	统计特征	平均值	标准差	变异系数
TI 融化指数/(℃·a)	2 912.40	123.78	4.32	冻结日数/d	154.54	8.10	5.32
FI 冻结指数/(℃·a*)	2 141.47	244.06	11.86	日均 TI 融化指数/(℃·d)	13.79	0.61	4.48
融化日数/d	210.11	8.35	3.99	日均 FI 冻结指数/(℃·d)	13.70	1.31	9.76

表 3 经纬度、海拔和冻融指数、日数及日均值之间的相关关系

Tab. 3 Correlation between longitude, latitude and altitude and freezing and thawing index, number of days and daily mean value

指标	纬度	经度	海拔	指标	纬度	经度	海拔
TI	-0.85**	0.32	-0.87**	冻结日数	0.89**	-0.35	0.84**
FI	0.89**	-0.17	0.66*	日均 TI	-0.80**	0.31	-0.88**
融化日数	-0.89**	0.36	-0.84**	日均 FI	0.86**	-0.00	0.50

注：*、**分别表示通过 0.05、0.01 显著性水平。下同。

表 4 经纬度海拔和冻融指数及冻融日数统计特征的相关关系

Tab. 4 Correlation between longitude, latitude altitude and freeze-thaw index and freeze-thaw days statistical characteristics

指标	纬度	经度	海拔	指标	纬度	经度	海拔
TI 变异系数	0.48	-0.50	0.63*	融化指数标准差	-0.44	-0.21	-0.26
FI 变异系数	-0.90**	-0.05	-0.57*	冻结指数标准差	0.45	-0.45	0.46
融化日数变异系数	0.56*	-0.54	0.85**	融化日数标准差	-0.12	-0.36	0.33
冻结日数变异系数	-0.86**	0.05	-0.59*	冻结日数标准差	-0.72**	-0.14	-0.36

3 结论与讨论

(1)近 30 a 研究区 TI 平均值为 2 912.40 ℃·a,FI 为 2 141.47 ℃·a*。年 TI 呈显著上升趋势,FI 呈微弱上升趋势。融化日数年平均值为 210.11 d,冻结日数为 154.54 d。融化日数处于上升趋势,冻结日数呈下降趋势,两者变化趋势不显著。

(2)研究区日均 TI 处于显著上升趋势,日均 FI 呈微弱的上升趋势。表明东北地区小于 0 ℃的冷季并没有变暖的趋势。大于 0 ℃和小于 0 ℃的累计积温与日均值有相反发展趋势,即暖季越暖、冷季微弱变冷。

(3)研究区大于 10 ℃的积温日数呈显著增加趋势,小于 -10 ℃日数呈微弱增加趋势,两者过渡期明显缩短,减少趋势显著。研究区冬季两端存在明显的"冷暖急转"现象,夏秋季明显延长,全年仍表现出不显著的变暖趋势。

(4)TI 各指标平均值要高于对应的 FI,波动也小于冻结指标。纬度和海拔是影响研究区热量分配主要因子,海拔对 TI 的影响要大于 FI。纬度和海拔越高,FI 和冻结日数变化越小,而 TI 和融化日数波动越大。

我国中高纬度地区变暖减缓具有区域性特征,从不同的温度界限来看,低于 0 ℃和 -10 ℃温度降低明显,这与在北半球冬季,热带外的大陆冬季的地表气温趋势存在着由增暖转变为近 10 a 接近中性甚至变冷的系统性减弱现象[17]、2004—2005 年大部分地区冬季平均气温低于历史平均值[36],2007—2008 年冬季平均气温与多年平均气温相比呈显著的负异常[37-39]等现象一致。20 世纪 80 年代前气象数据缺测较多,考虑到数据质量,该研究只采用了 1986—2015 年的气象资料,研究结果也只能说明该阶段内气候变化特征。另外,该地区研究站点较多,本文只选了 13 个国家基准气象站,因数据获取的限制,没有考虑国家基本站和一般站,下一步还需对更长的时间序列和更多的站点开展研究。同时"冷暖急转"现象和冷季微弱变冷的趋势对中高纬度地区冻融指数[40]、寒潮[41]以及降雪初终日变化[42]、地区经济环境和植被雪生态的反馈作用等还有待于进一步研究,这种变化发生的背后机制是否受太阳辐射、气溶胶、大洋环流变化的影响,还需在未来的研究中进一步探讨。

参考文献(References):

[1] IPCC. Climate Change 2013:The Physical Science Basis. Contribution to Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change[R]. USA:Cambridge University Press,2013.

[2] Carter B. There is a problem with global warming…it stopped in 1998[EB/OL]. Http://www. telegraph. co. uk/comment/personal-view/3624242/There-Is-a-problem-with-global-warming… - it-stopped-in - 1998. html,2014 - 10 - 10.

[3] Knight J,Kenneby J J,Folland C,et al. Do global temperature trends over the last decade falsify climate predictions? [J]. Bulletin of the American Meteorological Society,2009,90(8):22 - 23.

[4] Kerr R A. What happened to global warming? Scientists say just wait a bit[J]. Science,2009,326 (5949):28 - 29.

[5] Roberts C D,Palmer M D,Mc Neall D,et al. Quantifying the likelihood of a continued hiatus in global warming[J]. Nature Climate Change,2015,5(4):337 - 342.

[6] Yan X H,Boyer T,Trenberth K,et al. The global warming hiatus: Slowdown or redistribution? [J]. Earth's Future,2016,4(11): 472 - 482.

[7] Medhaug I,Stolpe M B,Fischer E M,et al. Reconciling controversies about the "global warming hiatus" [J]. Nature,2017,545 (7652):41 - 47.

[8] 王绍武,罗勇,唐国利,等. 近 10 年全球变暖停滞了吗? [J]. 气候变化研究进展,2010,6(2):95 - 99. [Wang Shaowu,Luo Yong,Tang Guoli,et al. Does the global warming pause in the last decade:1999 - 2008? [J] . Advances in Climate Change Research,2010,6(2):95 - 99.]

[9] 赵宗慈,罗勇,黄建斌. 围绕全球变暖"停滞"的争论[J]. 气候变化研究进展,2016,12(6):571 - 574. [Zhao Zongci,Luo Yong,Huang Jianbin. Debate on global warming "hiatus"[J]. Advances in Climate Change Research,2016,12(6):571 - 574.]

[10] Cowtan K,Way R G. Coverage bias in the HadCRUT4 temperature series and its impact on recent temperature trends[J]. Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society,2014,140(683): 1935 - 1944.

[11] Karl T R,Arguez A,Huang B,et al. Possible artifacts of data biases in the recent global surface warming hiatus[J]. Science,2015,348 (6242):1469 - 1472.

[12] Huang J,Zhang X,Zhang Q,et al. Recently amplified arctic warming has contributed to a continual global warming trend[J]. Nature Climate Change,2017,7(12):875 - 879.

[13] 苏京志,温敏,丁一汇,等. 全球变暖趋缓研究进展[J]. 大气科学,2016,40(6):1143 - 1153. [Su Jingzhi,Wen Min,Ding Yihui,et al. Hiatus of global warming:A review[J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences,2016,40(6):1143 - 1153.

[14] Meehl G A,Arblaster J M,Fasullo J T,et al. Model based evidence of deep ocean heat uptake during surface-temperature hiatus periods[J]. Nature Climate Change,2011,1(7):360 - 364.

[15] Lu N, Wilske B, Ni J, et al. Climate change in Inner Mongolia from 1955 to 2005 – trends at regional, biome and local scales[J]. Environmental Research Letters, 2009, 4(4): 045006.
[16] 李喜仓,郭瑞清,杨丽桃,等. 近 50 年内蒙古东部水热变化及对农业的影响[J]. 地理科学, 2009, 29(5): 755 – 759. [Li Xicang, Guo Ruiqing, Yang Litao, et al. Changes of precipitation and temperature and its impacts on agriculture in recent 50 years in Eastern Inner Mongolia[J]. Scientia Geographica Sinica, 2009, 29(5): 755 – 759.]
[17] Cohen J, Barlow M, Saito K. Decadal fluctuations in planetary wave forcing modulate global warming in late boreal winter[J]. Journal of Climate, 2009, 22(16): 4418 – 4426.
[18] 王迪,何金海,祁莉,等. 全球变暖减缓背景下欧亚秋冬温度变化特征和原因[J]. 气象科学, 2015, 35(5): 534 – 542. [Wang Di, He Jinhai, Qi Li, et al. Temperature characteristic of Eurasia in autumn and winter and its causes under global warming mitigation [J]. Journal of the Meteorological Sciences, 2015, 35(5): 534 – 542.]
[19] Solomon S. Climate Change 2007-The Physical Science Basis: Working Group I Contribution to the Fourth Assessment Report of the IPCC[M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2007.
[20] He Yong, Wu Yongfeng, Liu Qiufeng. Vulnerability assessment of areas affected by Chinese cryospheric changes in future climate change scenarios[J]. Chinese Science Bulletin, 2012, 57(36): 4784 – 4790.
[21] Humbert Angelika. Vulnerable ice in the Weddell Sea[J]. Nature Geoscience, 2012, 5(6): 370 – 371.
[22] 张廷军. 全球多年冻土与气候变化研究进展[J]. 第四纪研究, 2012, 32(1): 27 – 38. [Zhang Tingjun. Progress in global permafrost and climate change studies[J]. Advances in Earth Science, 2012, 32(1): 27 – 38.]
[23] Harris C, Arenson L U, Christiansen H, et al. Permafrost and climate in Europe: Monitoring and modelling thermal, geomorphological and geotechnical responses[J]. Earth-Science Reviews, 2009, 92(3): 117 – 171.
[24] Wu Qingbai, Zhang Tingjun, Liu Yongzhi. Permafrost temperatures and thickness on the Qinghai-Tibet Plateau[J]. Global and Planetary Change, 2010, 72(1 – 2): 32 – 38.
[25] Yang Meixue, Nelson Frederick E, Shiklomanov N I, et al. Permafrost degradation and its environmental effects on the Tibetan Plateau: A review of recent research [J]. Earth-Science Reviews, 2010, 103(1 – 2): 31 – 44.
[26] Cheng Guodong, Wu Tonghua. Responses of permafrost to climate change and their environmental significance, Qinghai-Tibet Plateau [J]. Journal of Geophysical Research, 2007, 112(F2): F02S3, doi: 10.1029/2006JF000631.
[27] Rowland J C, Jones C E, Altmann G, et al. Arctic landscapes in transition: Responses to thawing permafrost[J]. Eos, Transactions American Geophysical Union, 2010, 91(26): 229 – 230.
[28] Schuur E A G, Vogel J G, Crummer K G, et al. The effect of permafrost thaw on old carbon release and net carbon exchange from tundra[J]. Nature, 2009, 459 (7246): 556 – 559.
[29] Schaefer K, Zhang T J, Bruhwiler Lon, et al. Amount and timing of permafrost carbon release in response to climate warming[J]. Tellus Series B-Chemical and Physical Meteorology, 2011, 63(2): 165 – 180.
[30] DeConto R M, Galeotti S, Pagani M, et al. Past extreme warming events linked to massive carbon release from thawing permafrost [J]. Nature, 2012, 484(7392): 87 – 91.
[31] 曹斌,张廷军,彭小清,等. 黑河流域年冻融指数及其时空变化特征分析[J]. 地球科学进展, 2015, 30(3): 357 – 366. [Cao Bin, Zhang Tingjun, Peng Xiaoqing, et al. Spatial variability of freezing-thawing index over the Heihe River Basin[J]. Advances in Earth Science, 2015, 30(3): 357 – 366.]
[32] 高泽永,王一博,刘国华,等. 多年冻土区活动层土壤水分对不同高寒生态系统的响应[J]. 冰川冻土, 2014, 36(4): 1002 – 1010. [Gao Zeyong, Wang Yibo, Liu Guohua, et al. Response of soil moisture within the permafrost active layer to different alpine ecosystems[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2014, 36(4): 1002 – 1010.]
[33] Frauenfeld Oliver W, Zhang Tingjun, Mccreight James L. Northern hemisphere freezing/thawing index variations over the twentieth century[J]. International Journal of Climatology, 2007, 27(1): 47 – 63.
[34] 冯青荣,刘普幸. 近 54 a 中国北方严寒期时空变化特征及其影响因素[J]. 干旱区研究, 2017, 34(2): 316 – 323. [Feng Qingrong, Liu Puxing. Spatiotemporal change of cold periods and their affecting factors in north China in recent 54 years[J]. Arid Zone Research, 2017, 34(2): 316 – 323.]
[35] 代海燕,朝鲁门,杨丽萍,等. 内蒙古温暖与寒冷指数在气温突变前后异常变化特征[J]. 干旱区研究, 2019, 36(1): 204 – 211. [Dai Haiyan, Chao Lumen, Yang Liping, et al. Abnormal change of warmth index coldness index before and after temperature mutation in Inner Mongolia[J]. Arid Zone Research, 2019, 36(1): 204 – 211.]
[36] Ding Yihui, Ma Xiaoqing. Analysis of isentropic potential vorticity for a strong cold wave in 2004/2005 winter[J]. Acta Meteorologica Sinica, 2007, 65(5): 695 – 707.
[37] Hong C C, Li T. The extreme cold anomaly over Southeast Asia in February 2008: Roles of ISO and ENSO[J]. Journal of Climate, 2009, 22(13): 3786 – 3801.
[38] Wen M, Yang S, Kumar A, et al. An analysis of the large-scale climate anomalies associated with the snowstorms affecting China in January 2008[J]. Monthly Weather Review, 2009, 137(3): 1111 – 1131.
[39] 张自银,龚道溢,郭栋,等. 我国南方冬季异常低温和异常降水事件分析[J]. 地理学报, 2008, 63(9): 899 – 912. [Zhang Ziyin, Gong Daoyi, Guo Dong, et al. Anomalous winter temperature and precipitation events in Southern China[J]. Acta Geographica Sinica, 2008, 63(9): 899 – 912.]
[40] 罗那那,巴特尔·巴克,吴燕锋,等. 石河子地区年冻融指数的

多尺度变化特征[J]. 干旱区研究,2017,34(3):511 - 517. [Luo Nana, Bake Batur, Wu Yanfeng, et al. Multiscale variation of annual freezing and thawing indexes in Shihezi[J]. Arid Zone Research,2017,34(3):511 - 517.]

[41] 罗继,代君梅,杨虎,等. 1971—2014 年新疆区域寒潮气候特征[J]. 干旱区研究,2017,34(2):309 - 315. [Luo Ji, Dai Junmei, Yang Hu, et al. Climatic characteristics of cold wave in Xinjiang during the period of 1971 - 2014[J]. Arid Zone Research,2017, 34(2):309 - 315.]

[42] 王丽伟,黄晓龙,许晖,等. 吉林省降雪初终日时空变化特征[J]. 干旱区研究,2019,36(4):980 - 989. [Wang Liwei, Huang Xiaolong, Xu Hui, et al. Temporal spatiotemporal change of the beginning and ending dates of snowfall in Jilin Province[J]. Arid Zone Research,2019,36(4):980 - 989.]

The rate of warming is slowing and temperature is showing sharp changes in middle and high latitude regions

DAI Hai-yan[1], CHEN Gao-wa[2], WU Jian-hua[3], YANG Li-ping[1], DU Wa-la[1]

(1. *Inner Mongolia Ecology and Agricultural Meteorology Centre*, *Hohhot* 010051, *Inner Mongolia*, *China*;
2. *Hulun Buir Meteorological Bureau*, *Hulun Buir* 021008, *Inner Mongolia*, *China*;
3. *Chifeng Meteorological Bureau*, *Chifeng* 024000, *Inner Mongolia*, *China*)

Abstract: This work used daily temperature data spanning 30 years from 13 national benchmark climate stations in the mid-latitude regions of China to assess the freezing/thawing index and trends in the number of freezing/thawing days. The results show that the thawing index shows a significantly increasing trend and the freezing index shows a slightly increasing trend. An upward trend in thawing days and downward trend in freezing days were insignificant. The daily average thawing index significantly increased, whereas the daily average freezing index slightly increased. The characteristics of cold and warm polarizations were obvious. The more than 10 ℃ accumulated temperature and days in study area showed a significantly increasing trend, the less than -10 ℃ accumulated temperature showed a downtrend, and the less than -10 ℃ accumulated temperature days on the rise trend, the transition between two periods significantly decreased. The fluctuation in the thawing index was clearly less than that of the freezing index. Moreover, the thawing index was negatively correlated with latitude and altitude, whereas the freezing index was positively correlated with latitude and altitude. The influence of altitude on the thawing index was greater than that of the freezing index. As the latitude and altitude increased, the change in freezing index and freezing days were observed to be more stable, and the corresponding melting index showed larger fluctuations. On the whole, the rate of warming has slowed in China's mid and high latitudes since the 1990s, and the polarization of average daily temperature and the sharp change in temperature are obvious in both the cold and warm seasons.

Key words: freezing index; thawing index; climatic anomaly; mid-latitude; China